

© 2018 IEEE. Personal use of this material is permitted. Permission from IEEE must be obtained for all other uses, in any current or future media, including reprinting/republishing this material for advertising or promotional purposes, creating new collective works, for resale or redistribution to servers or lists, or reuse of any copyrighted component of this work in other works.

This is the Author's Pre-print version of the following article: *I. A. Díaz-Díaz, E. J. Ávila-Martínez and M. Rodríguez-Licea, "Multipoint Power Quality Monitoring System," 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, 2018, pp. 1-5.* To access the final edited and published work is available online at: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2018.8661480>

Multipoint Power Quality Monitoring System

Irwin A. Díaz-Díaz, Eber J. Ávila-Martínez

División de Matemáticas Aplicadas
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica
Camino a la Presa San José 2055, Col. Lomas 4ta Sección
C.P. 78216, San Luis Potosí, SLP, México
Email: {irwin.diaz, eber.avila}@ipicyt.edu.mx

Martín Rodríguez-Licea

CONACYT-Instituto Tecnológico de Celaya
Departamento de Ingeniería Electrónica
Antonio García Cuabas 600, Col. Fovisste,
Celaya, Guanajuato, México
Email: martin.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Abstract—In this paper, a multipoint power quality monitoring system is presented. The designed system is versatile and consist of one or more standalone portable power monitoring devices with database server capability and local/remote visualization of the power quality indicators such as harmonics, total harmonic distortion, power factor, among others. The portable monitoring devices can measure, record and share information about power quality indicators. A feature of the proposed system is its capability to measure, record data regularly for an extended period and share information. A waveform reconstruction of the measured variables such as voltage, current, active, reactive and apparent power of a 3-phase power line can be performed with the acquired data. Also, each power monitoring device can detect power quality disturbances as well as generate alarms. The developed system has an open architecture; therefore, its functionality can be improved, adapted and scaled for research, educational, institutional or commercial purposes.

Keywords—power quality, harmonics, SQL, remote monitoring

I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es esencial para el funcionamiento de los procesos de producción industrial, el uso comercial, el transporte y para satisfacer nuestras comodidades personales. Durante las dos últimas décadas, el desarrollo de la electrónica de potencia y el uso de cargas no lineales conectadas a la red eléctrica han incrementado los problemas en la calidad de la energía eléctrica (CEE) en todo el mundo. En años recientes, la CEE ha causado preocupación e interés en la comunidad científica (vea [1]-[3] y las referencias en ellos). Normalmente, la baja calidad en el suministro de energía es causada por diversos factores, tales como: transitorios, interrupciones momentáneas, subidas y caídas de tensión, sobrevoltaje y distorsión armónica. Otro problema, es la inclusión de la electrificación de vehículos y la generación de energías renovables; sin embargo, el impacto de estas tecnologías en la CEE no ha sido examinado o cuantificado.

La correcta interpretación de la CEE ayuda a la detección temprana de fallas en los equipos, así como a prevenir penalizaciones impuestas por las empresas encargadas de suministrar la energía eléctrica debidas al uso ineficiente de la energía. Los indicadores de la CEE se categorizan en varios tipos, tales como: variaciones de frecuencia y voltaje, continuidad en el suministro de energía, desbalance de corrientes, distorsión armónica, entre otros [4]. Distintas organizaciones han propuesto valores recomendados para cada indicador [5]-[7]. Sin embargo, la medición y el cálculo de los indicadores no

es una tarea trivial y requiere la instalación de analizadores electrónicos costosos en los puntos de interés de la línea de alimentación. La información adquirida regularmente es salvaguardada internamente en el dispositivo para, posteriormente realizar un análisis fuera de línea. Sin embargo, debido a la cantidad de datos adquiridos, el intervalo de tiempo que se puede almacenar de las señales es corto. Además, tener acceso remoto en tiempo real a la información adquirida es esencial para el manejo eficiente de la energía en diferentes puntos de la línea de alimentación. En varios artículos se han presentado sistemas capaces de almacenar los indicadores de la CEE en una base de datos (BD), de esta forma una gran cantidad de datos se pueden guardar y acceder remotamente [8]-[10]. Desafortunadamente, estos sistemas son costosos, lo que compromete el crecimiento del sistema.

En la literatura podemos encontrar algunas propuestas de sistemas de monitoreo de la CEE. En [9] se describe un sistema de monitoreo escalable basado en un procesador digital de señales (DSP). El sistema cuenta con acceso a la red y es capaz de registrar algunas docenas de eventos en la red eléctrica. En [11] se presenta un sistema de monitoreo de bajo costo basado en una plataforma de desarrollo de código abierto, Arduino. El sistema cuenta con un servidor web de BD. La frecuencia de muestreo para adquirir las señales es baja; por lo tanto, no es posible detectar transitorios. Un instrumento monitor de bajo costo basado en un DSP se propone en [12]. El instrumento, que cuenta con una etapa dedicada a la conversión analógico-digital, lee los datos para calcular la transformada rápida de Fourier y obtiene algunos indicadores de la CEE; además, cuenta con comunicación RS-485. En [13] se presenta un sensor de la CEE que utiliza circuitos integrados de bajo costo para detectar perturbaciones en la red eléctrica. El sensor cuenta con transmisión a través de internet; sin embargo, no puede actuar como un monitor independiente, por lo que depende de la disponibilidad de la red. Los sistemas mencionados son de arquitectura abierta, desafortunadamente tienen algunas carencias, no permiten reconstruir las señales de interés, tampoco pueden funcionar como un monitor independiente, i.e., salvaguardar los datos adquiridos sin estar conectados a internet. Debido a lo anterior, en este artículo se presenta un sistema remoto para el monitoreo de la CEE. El sistema propuesto es de bajo costo, puede desplegar local o remotamente la forma de onda del voltaje y la corriente, calcular y guardar la potencia activa, reactiva y aparente, así como los armónicos de voltaje y corriente. Además, el sistema permite realizar mediciones en sistemas monofásicos o trifásicos con conexión en delta o estrella.

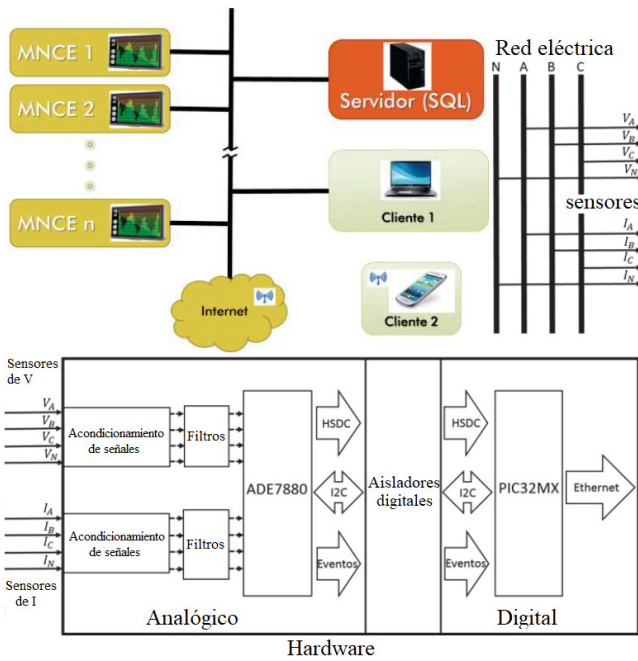


Figura 1. Diagrama a bloques del sistema de monitoreo remoto de la CEE.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera, en la Sección II se presenta una descripción general del sistema de monitoreo de la CEE. El sistema de manejo de la BD SQL y la interfaz de visualización se presentan en la Sección III. En la Sección IV se muestran los resultados de las pruebas experimentales. Finalmente, las conclusiones de este trabajo se presentan en la Sección V.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

El sistema de monitoreo de la CEE desarrollado consiste de varios medidores y notficadores de la calidad de la energía (MNCE), conformados por hardware y software. En la Fig. 1 se muestra el diagrama a bloques del sistema de monitoreo remoto de la CEE. El sistema puede realizar mediciones en sistemas monofásicos y trifásicos (con conexión delta o estrella). Los indicadores de la calidad de la energía (ICE) y el consumo de potencia se pueden monitorear y desplegar de manera remota. Los ICE seleccionados en el presente trabajo son: el cálculo de los armónicos de voltaje y corriente, hasta el 51, la distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés), así como el factor de potencia (FP). Además, el sistema puede ser configurado para enviar alarmas en caso de sobretensión, sobrecorriente o caída de voltaje.

II-A. Software

Las señales y las variables de interés se guardan en un servidor de BD SQL instalado en cada MNCE conectado en red. De esta manera, los datos se pueden acceder de manera remota por los clientes (computadora personal, teléfono inteligente, servidor web, entre otros) con un cliente SQL o mediante consultas a un servidor web. La encriptación, la seguridad y la integridad de los datos se realiza en el servidor SQL. Cabe mencionar que el tamaño de la BD solamente está limitado

por la capacidad del dispositivo de almacenamiento. Se elige SQL Server Express 2014 porque *i)* es gratuito, *ii)* es altamente compatible con otros sistemas/software (e.g., dSPACE, Simulink), *iii)* existen bibliotecas y ejemplos gratuitos para futuros desarrollos y *iv)* es un servidor de BD robusto y estable. Cada MNCE está constituido por una NUC (del inglés, Next Unit of Computing) y una pantalla LCD. El sistema propuesto tiene la funcionalidad de medir las señales de voltaje y corriente, calcular los ICE, registrar el consumo de datos y las banderas de alarma, todos estos datos se transmiten a la NUC. La NUC salvaguarda los datos en un servidor SQL a través de una red.

II-B. Hardware

La corriente de la red, monofásica o trifásica, se mide usando bobinas de Rogowski; por simplicidad se seleccionan las bobinas Fluke modelo i2000 Flex. Las bobinas tienen la opción de seleccionar tres rangos de medición, 30, 300 y 3000 A con un voltaje de salida de 100 mV/A, 10 mV/A y 1 mV/A, respectivamente. El voltaje de fase a tierra se mide mediante un divisor de tensión. Las señales de corriente y voltaje se adaptan a los valores permisibles (± 500 mV) del circuito de acondicionamiento de señal; posteriormente, se aplica un filtro pasa bajas para rechazar las componentes de alta frecuencia. El ADE7880 de Analog Devices es un circuito integrado de alta precisión. El ADE7880 mide la energía eléctrica de sistemas trifásicos, usa convertidores de analógico a digital sigma delta de segundo orden, un integrador digital, circuitería de referencia y todo el procesamiento de señales necesario para calcular los valores RMS de corriente y voltaje, los armónicos presentes en la señal, así como el cálculo de la potencia activa, reactiva y aparente para cada fase. El ADE7880 puede ser configurado por comunicación SPI o I²C. La configuración se realiza por un microcontrolador de 32 bits de la familia PIC32MX de Microchip. Una vez que el ADE7880 es configurado, las mediciones y los cálculos de los ICE son extraídos por el PIC32MX. Se usa una técnica de doble buffer para transmitir los datos vía USB/Ethernet. Con la finalidad de establecer la configuración del ADE7880, iniciar la transmisión de los ICE y calcular el consumo de energía se desarrolla un protocolo de comunicación entre el PIC32MX y la NUC. Este protocolo está constituido por los comandos de configuración y especifica el formato de los datos de los ICE y el consumo de energía. El esquema de comunicación usado entre el ADE7880 y el PIC32MX permite muestrear hasta a 8 kHz las señales de corriente y voltaje de las tres fases, así como la del neutro. Cuando no hay valores inesperados en los ICE, no es necesario enviar todos los datos; por lo tanto, sólo se envían tres ciclos por cada segundo de la forma de onda del voltaje y la corriente. Por otro lado, cuando se alcanza cierto umbral de alarma, se envían los tres ciclos inmediatamente y también se calculan los ICE. El cálculo de los armónicos, la THD y la potencia se realiza en grupos de 11 ICE/s, esta baja tasa es una característica del estándar IEC 1159 [5].

III. SISTEMA DE MANEJO DE BASE DE DATOS E INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN

El programa de visualización y el sistema de manejo de BD de SQL se desarrollan por separado. La interfaz de visualización se puede usar localmente en el MNCE o remotamente por un cliente conectado directamente al MNCE. El sistema de

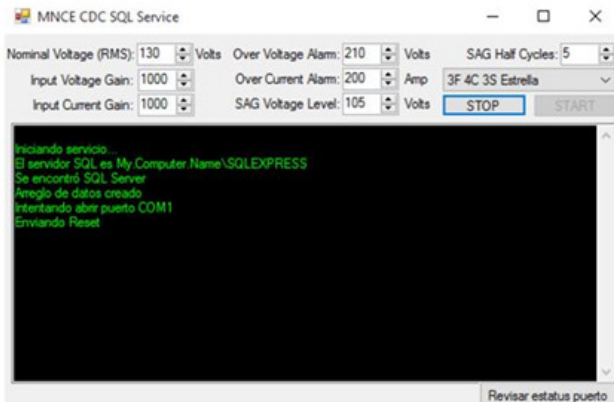


Figura 2. Interfaz de configuración y supervisión.

manejo de la BD de SQL permite seleccionar la configuración del tipo de conexión (delta/estrella, 3 o 4 cables), los umbrales de alarma y las ganancias de entrada, según el rango de las señales medidas. La interfaz despliega los mensajes de estado y error, permite buscar un MNCE remoto, detectar y configurar el servidor de la BD para iniciar el servicio. Además, se implementa un programa para detectar fallas en los distintos MNCE y recuperar, si es posible, la comunicación con el/los MNCE. En la Fig. 2 se muestra una impresión de pantalla de la interfaz de configuración desarrollada.

Debido a que no se requiere una alta precisión en el dato salvaguardado de las señales adquiridas, éste se comprime a dos bytes. Cada bloque se inserta en una tabla de la BD que consta de un índice, una estampa con la hora y la fecha, los indicadores de fase, número de bloques o armónicos y, un campo de cadena de tamaño único y ajustado. Esta estructura permite guardar hasta por 24 horas los ICE y los datos de consumo, incluidos los eventos de alarma en tan sólo 1 Gb de espacio en disco duro. En caso de que sature el disco duro, se eliminan automáticamente los datos más antiguos, pero se conservan los eventos de alarma y sus formas de onda. Si no es posible realizar una eliminación automática, se envía un correo electrónico de alarma a un usuario predefinido, se requiere una conexión a internet para poder realizar el envío de la alarma. El programa de visualización realiza la reconstrucción de las formas de onda y los valores puntuales de los ICE (local o remoto). Los datos se pueden visualizar (localmente) en una pantalla LCD de 7 pulgadas conectada a la NUC a través de un puerto HDMI. La interfaz gráfica desarrollada permite seleccionar por hora y fecha los datos para ser desplegados *in situ*. Además, la interfaz permite exportar los datos almacenados a un archivo de valores separados por comas (CSV). En la Fig. 3 se muestra el prototipo de uno de los MNCE, así como una impresión de pantalla de la interfaz desarrollada.

Con la finalidad de hacer la visualización independiente del sistema operativo, e.g., Windows, iOS, Android, linux, se introduce un servidor web para acceder remotamente a los datos utilizando un navegador web HTML. El alojamiento web utilizado es Microsoft Azure y se desarrolla una aplicación web en .NET Framework con Visual Studio Express que es gratuito. En la Fig. 4 se muestra una impresión de pantalla

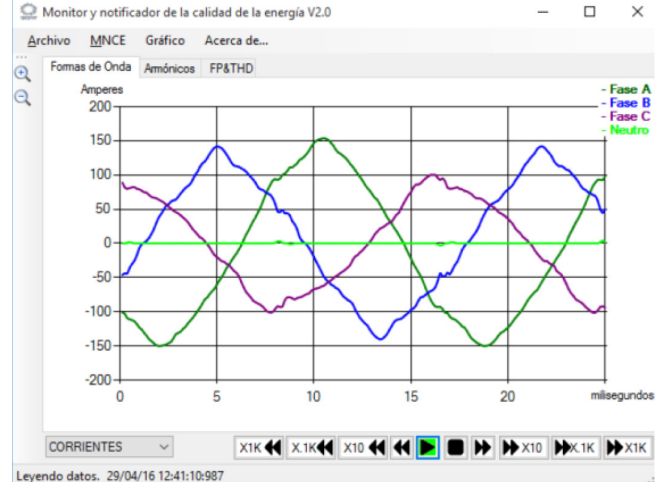
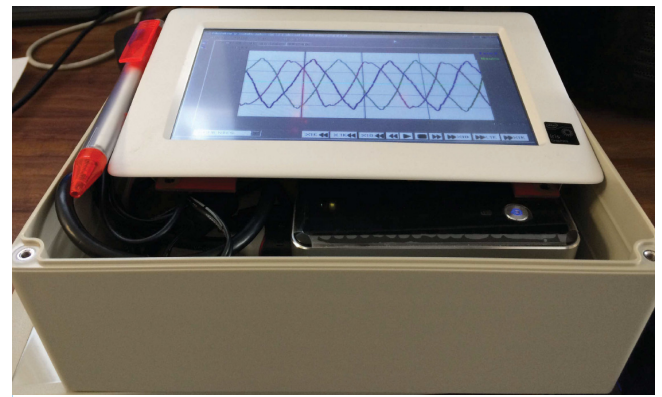


Figura 3. MNCE desarrollado e impresión de pantalla de la interfaz local.

de la interfaz web desarrollada. Como se puede apreciar, la interfaz cuenta con la opción de visualizar la forma de onda del voltaje y la corriente, los armónicos, la THD, el factor de potencia y el costo de la energía. El costo instantáneo que se muestra en la Fig. 4 es el costo por hora en pesos mexicanos, si el consumo de energía se mantuvo en el nivel medido. El costo se calcula utilizando las fórmulas que utiliza la Comisión Federal de Energía y considerando una demanda de potencia máxima en función de la hora y del día. En la Fig. 5 se muestra el desplieggo de los armónicos de corriente de un sistema trifásico. La interfaz permite seleccionar el número de armónico hasta el que se quiere desplegar, en este caso se selecciona desplegar hasta el armónico 10. La razón de poder seleccionar el número de armónico a desplegar es para agilizar la visualización de ellos en la interfaz. La interfaz permite desplegar hasta el armónico número 51, requisito que pide el estándar IEC 1159 [5].

Por último, para demostrar que la interfaz remota es independiente del sistema operativo en la Fig. 6 se muestra la visualización remota de las señales de voltaje de un sistema trifásico adquiridas en tiempo real. La visualización se realiza en una tableta con Android y un iPad mediante el navegador web de ambos sistemas operativos.

IV. PRUEBAS EXPERIMENTALES

El sistema propuesto se instala en la red eléctrica de uno de los edificios del IPICYT, en San Luis Potosí, México; a



Figura 4. Impresión de pantalla de la interfaz web desarrollada.

la par del sistema, se instala un analizador de la calidad de la energía eléctrica de la marca HIOKI modelo 3197. Las mediciones realizadas con el analizador HIOKI se almacenan en la memoria interna del mismo. En la Fig. 7 se muestran las formas de onda de cada fase medidas con el analizador HIOKI y el sistema propuesto. El ADE7880 adquiere y envía las señales de voltaje y corriente a 8 kHz, mientras que el analizador comercial presenta mediciones a 10.2k Hz. El MNCE desarrollado permite calcular y guardar los armónicos, el THD y el factor de potencia de cada fase simultáneamente. Además, el MNCE inserta los ICE y los valores de consumo en la BD SQL para tenerlos disponibles a través de internet. Los datos pueden ser simultáneamente monitoreados en diferentes dispositivos a través de la aplicación web. Por otro lado, el analizador comercial debe desconectarse o dejar de adquirir datos para acceder a la información almacenada en varios archivos CSV para poder realizar una comparación fuera de línea. Cabe destacar que estas comparaciones se realizan de manera aproximada en el tiempo debido a la dificultad de sincronizar el tiempo exacto (milisegundos) del analizador comercial.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un sistema remoto para determinar la calidad de la energía eléctrica. El prototipo permite la

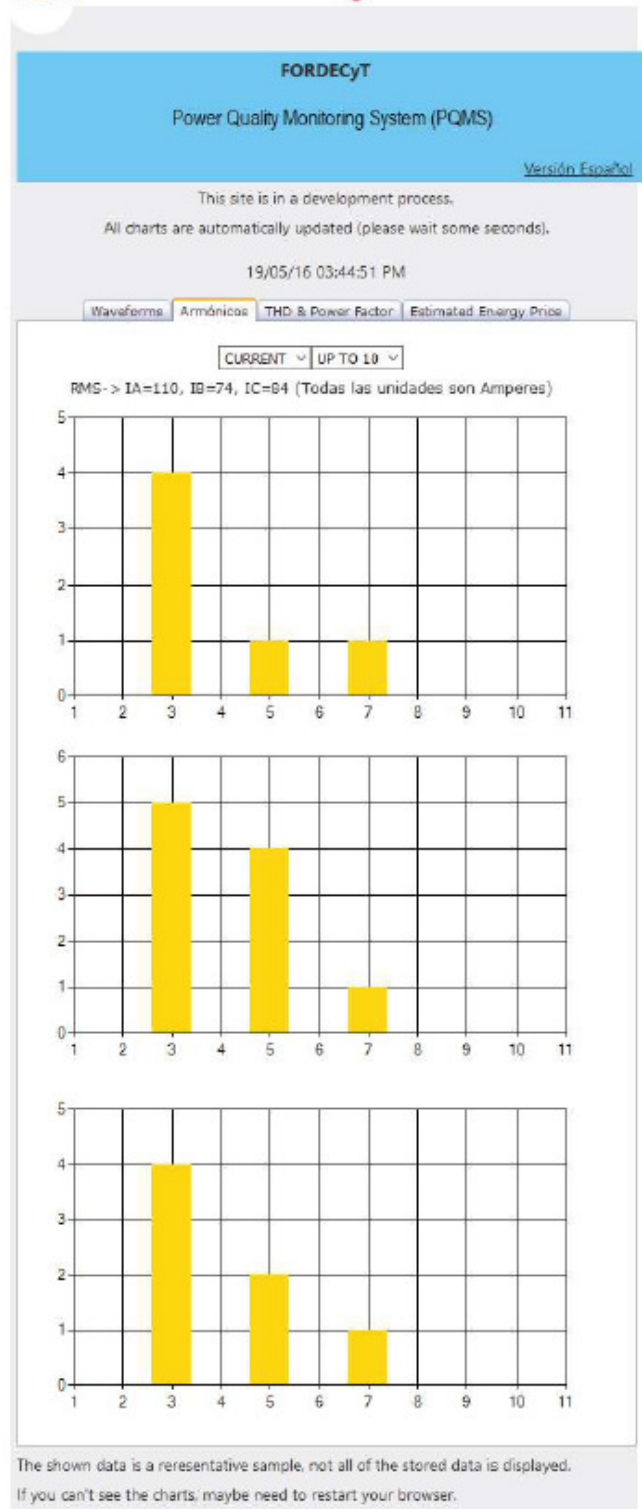


Figura 5. Impresión de pantalla mostrando el contenido armónico.



Figura 6. Visualización local y remota, en Android y en iOS.

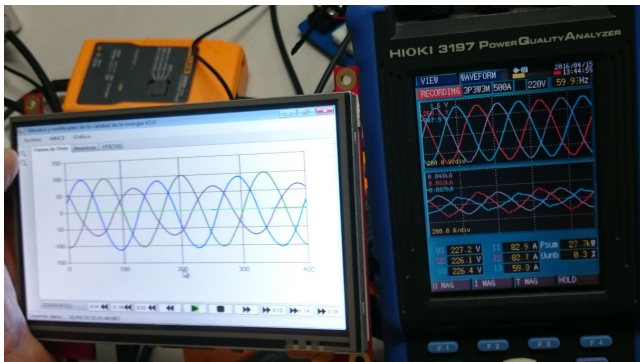


Figura 7. Comparación visual del sistema desarrollado con uno comercial.

medición de la corriente y el voltaje; además, calcula, despliega y almacena la THD, los armónicos (hasta el 51) de voltaje y corriente, el factor de potencia, así como la potencia activa, reactiva y aparente de un sistema monofásico o trifásico. El sistema es de bajo costo y permite compartir, en tiempo real (*in situ* o remotamente), las variables medidas y calculadas mediante una aplicación web conectada a una base de datos SQL. El sistema permite mostrar en tiempo real los indicadores de la calidad de la energía eléctrica a través de un navegador web, así como visualizar en una gran variedad de dispositivos la forma de onda del voltaje y la corriente, los armónicos, entre otros. Con algunas modificaciones, el sistema desarrollado puede ser usado como una poderosa herramienta didáctica para estudiantes e ingenieros. También, el sistema puede ser extendido a otras aplicaciones de instrumentación y medición tales como monitoreo de sistemas de potencia fotovoltaicos, redes inteligentes, cargadores de vehículos eléctricos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo financiero otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en el proyecto FORDECYT No. 190966. Eber J. Ávila

Martínez agradece el apoyo financiero del CONACYT por la beca 279217. Martín Rodríguez-Licea agradece al CONACYT por la cátedra 4155.

REFERENCIAS

- [1] S. Elphick, P. Ciuffo, G. Drury, V. Smith, S. Perera and V. Gosbell, "Large Scale Proactive Power-Quality Monitoring: An Example From Australia," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 32, no. 2, pp. 881-889, April 2017.
- [2] A. Teke, L. Saribulut and M. Tumay, "A Novel Reference Signal Generation Method for Power-Quality Improvement of Unified Power-Quality Conditioner," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 4, pp. 2205-2214, Oct. 2011.
- [3] Y. Liu, M. Steurer and P. Ribeiro, "A novel approach to power quality assessment: real time hardware-in-the-loop test bed," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 1200-1201, April 2005.
- [4] Mohammad A.S. Masoum, Ewald F. Fuchs, "Chapter 8 - Impact of Poor Power Quality on Reliability, Relaying and Security," *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, 2nd ed., Academic Press, 2015, pp. 681-778.
- [5] "Recommended practice for monitoring electric power quality," IEC Std. 1159-2009 (Revision of IEEE Std. 1159-1995), pp. c1-81, June 2009.
- [6] "Electromagnetic compatibility," IEC 61000-6-1:2005, June 2005.
- [7] "Standard en 50160 - voltage characteristics in public distribution systems," Standard EN 50160, July 2004.
- [8] C. Tsai, S.-J.S.; Luo, "Synchronized power-quality measurement network with lamp," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, 01, 2009.
- [9] D. Divan, G. A. Luckjiff, W. E. Brumsickle, J. Freeborg, and A. Bhadkamkar, "A grid information resource for nationwide real-time power monitoring," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 2, pp. 699-705, March 2004.
- [10] R. Alves, D. Goncalves, J. G. Pinto, J. Batista, and J. L. Afonso, "Development of an electrical power quality monitor based on a PC," *IECON 2009, IEEE Ind. Elec.*, Nov 2009, pp. 3649-3653.
- [11] I. Liaperdos, I. Paraskevas, S. M. Potirakis, and M. Rangoussi, "Building a low-cost network for power-quality monitoring with open-source hardware nodes," *7th Mediterranean Conf. and Exhibition Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Convers. (MedPower 2010)*, Nov 2010, pp. 1-5.
- [12] Z. Zou, Y. Liu, F. Zhao, and M. Peng, "Design and data processing of a real-time power quality monitoring instrument," *9th Int. Conf. Electronic Meas. Instruments*, Aug 2009, pp. 4-353-4-357.
- [13] J. J. G. de la Rosa and A. Moreno-Muoz, "A web-based distributed measurement system for electrical power quality monitoring," *IEEE Sensors Appl. Symp.*, Feb 2010, pp. 206-211.